



(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENTAMT

# Offenlegungsschrift

(10) DE 195 06 938 A 1

(51) Int. Cl. 6:

**G 01 B 7/30**

G 01 B 21/22

G 01 D 5/12

B 62 D 15/02

// G01B 101:33,

121:08

(21) Aktenzeichen: 195 06 938.2

(22) Anmeldetag: 28. 2. 95

(23) Offenlegungstag: 29. 8. 96

(71) Anmelder:

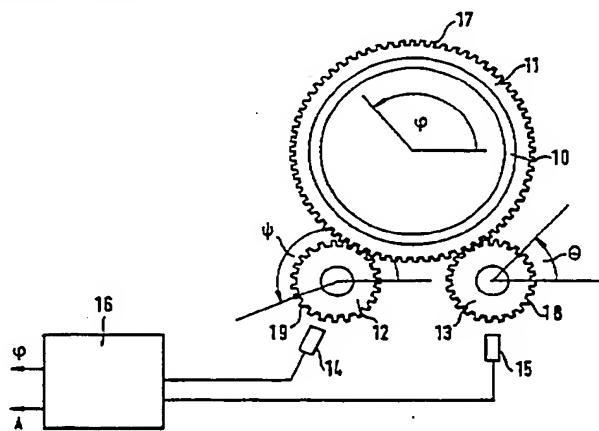
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:

Zabler, Erich, Dr.-Ing., 76297 Stutensee, DE; Marx, Klaus, Dr.rer.nat., 70565 Stuttgart, DE; Jost, Franz, Dr.rer.nat., 70565 Stuttgart, DE; Abendroth, Manfred, Dr.-Ing., 71672 Marbach, DE; Braun, Hans, Dr.-Ing., 70178 Stuttgart, DE

(54) Verfahren und Vorrichtung zur Winkelmessung bei einem drehbaren Körper

(57) Es wird ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung des Winkels eines drehbaren Körpers, insbesondere eines um mehr als  $360^\circ$  drehbaren Körpers, beschrieben. Dieser drehbare Körper wirkt dabei mit wenigstens zwei weiteren drehbaren Körpern zusammen, beispielsweise Zahnrädern, deren Winkelposition mit Hilfe zweier Sensoren ermittelt wird. Aus den so ermittelten Winkelpositionen wird die Winkelstellung des drehbaren Körpers bestimmt. Damit eindeutige Aussagen möglich sind, ist es erforderlich, daß alle drei drehbaren Körper bzw. Zahnräder bestimmte vorgebbare Zähnezahlen aufweisen. Das Verfahren und die Vorrichtung lassen sich beispielsweise zur Ermittlung des Lenkwinkels eines Kraftfahrzeugs verwenden.



DE 195 06 938 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 07.96 602 035/397

8/27

DE 195 06 938 A 1

## Beschreibung

## Stand der Technik

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Messung des Winkels eines drehbaren Körpers, insbesondere eines um mehr als  $360^\circ$  drehbaren Körpers, nach der Gattung des Hauptanspruchs.
- Bei verschiedenen Anwendungen, besonders bei Einrichtungen, mit deren Hilfe die Winkelstellung einer drehbaren Welle ermittelt werden soll, besteht das Bedürfnis, gleich nach der Inbetriebnahme der Einrichtung 10 die genaue Stellung der Welle zu kennen. Diese Forderung läßt sich am besten mit Hilfe von analogen Winkelsensoren, beispielsweise Potentiometern realisieren, die in jeder Position nach dem Einschalten sofort den gültigen Winkelstellungswert in Form einer Spannung ausgeben.
- Werden solche Einrichtungen zur Winkelmessung für Winkelbereiche, die größer als  $360^\circ$  sind, eingesetzt, ergibt sich das Problem, daß nicht mehr feststellbar ist, in welcher Umdrehung sich die Welle befindet. Zur 15 Auswertung von Winkelbereichen, die größer als  $360^\circ$  sind, können jedoch Inkrementalgeber verwendet werden, bei denen die Winkelstellung durch Vor- und Rückwärtszählen von Impulsen ermittelt wird. Mit solchen Inkrementalgebern läßt sich jedoch keine Absolutwinkelmessung durchführen, denn es können nur Inkremente gezählt werden, die sich an einem Aufnehmer vorbeibewegen.
- Damit eine Winkelmessung für Winkelbereiche größer als  $360^\circ$  möglich ist, wird in der derzeit noch nicht 20 veröffentlichten deutschen Patentanmeldung DE-P 44 09 892 im Zusammenhang mit der Erfassung eines Lenkwinkels eines Kraftfahrzeuges vorgeschlagen, die Bestimmung des Lenkradwinkels, der sich über einen Bereich von  $\pm 720^\circ$  erstreckt, mit Hilfe eines Planetenumlaufgetriebes durchzuführen. Dabei ist dieses Planetenumlaufgetriebe bezüglich seiner Zähnezahlen so dimensioniert, daß sich für die Übersetzung zwischen Lenkwelle und abzutastender Geberscheibe ein Wert von genau 4 ergibt. Die abzutastende Geberscheibe dreht sich also nur einmal, während sich der Lenkwinkel um  $\pm 720^\circ$  verändert. Durch Aufbringung eines Codes auf die Geberscheibe und Abtastung mittels eines geeigneten Aufnehmers läßt sich die Stellung der Geberscheibe sofort nach dem 25 Einschalten der Einrichtung ermitteln, damit ist auch eine Lenkradwinkelbestimmung sofort möglich.
- Diese bekannte Einrichtung zur Winkelmessung für Winkelbereiche größer als  $360^\circ$  hat den Nachteil, daß ein exakt dimensioniertes Planetenumlaufgetriebe erforderlich ist und zusätzlich ein aufwendiges Absolutgeberystem benötigt wird.

## Vorteile der Erfindung

Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Winkelmessung bei einem 35 drehbaren Körper, insbesondere bei einem um mehr als  $360^\circ$  drehbaren Körper, hat demgegenüber den Vorteil, daß eine ganz allgemeine absolute Winkelmessung auch bei mehreren Umdrehungen möglich ist, ohne daß ein aufwendiges Planetengetriebe erforderlich ist. Durch die Verwendung zweier Sensoren, die zwei verschiedene Winkel ermitteln, werden Meßfehler reduziert. Das Meßprinzip läßt sich auf alle Winkelsensortypen wie 40 optische, magnetische, kapazitive, induktive, resistive Sensoren anwenden, also auf beliebige Kontakt- und kontaktlose Sensoren.

Erzielt werden diese Vorteile, indem die Welle, deren Winkellage ermittelt werden soll, mit einem Zahnräder oder einem Zahnkranz versehen wird, der mit zwei weiteren Zahnrädern zusammenwirkt, deren Winkelstellung mit Hilfe je eines Sensors laufend ermittelt wird und indem der zu ermittelnde Winkel aus den beiden gemessenen Winkeln in geeigneter Weise berechnet wird.

Besonders vorteilhaft ist, daß sich der Winkelbereich und die Winkelgenauigkeit durch geeignete Wahl der 45 Zahl der Winkelmarken bzw. -zähne der einzelnen Zahnräder oder Zahnkränze frei einstellen läßt. Die Anordnung der Zahnräder kann so gewählt werden, daß gewünschte Vorteile entstehen. Dabei können die Zahnräder in einer Ebene oder in unterschiedlichen Ebenen angeordnet sein.

Weitere Vorteile der Erfindung werden durch die in den Unteransprüchen angegebenen Maßnahmen erzielt. 50 Dabei ist besonders vorteilhaft, daß zu große Meßfehler und der Ausfall eines Einzelsensors erkannt werden. Es ist durch Vergleich mit den letzten Werten erkennbar, welcher Sensor ggf. defekt ist und es ist in vorteilhafter Weise auch ein Notbetrieb mit einem einzigen Sensor möglich. Bei Verwendung eines 8-Bit-Analog-Digitalwandlers ist bei einem Lenkwinkelsensor, der nach dem erfindungsgemäßen Prinzip arbeitet, eine theoretische Auflösung von weniger als  $0,1^\circ$  des Lenkwinkels erreichbar.

55

## Zeichnung

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der Zeichnung dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Dabei zeigt im einzelnen Fig. 1 eine erste Anordnung, mit der der Winkel einer um 60 mehr als  $360^\circ$  drehbaren Welle erfaßbar ist. Fig. 2 zeigt das Ausführungsbeispiel eines Lenkwinkelsensors, wobei Fig. 2a die Anordnung der Zahnräder in einer Draufsicht und Fig. 2b in gesamte Anordnung zur Erfassung des Lenkwinkels einschließlich der zugehörigen Sensoren sowie der Auswerteschaltung darstellt. In Fig. 3 ist ein Flußdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt.

65

## Beschreibung

In Fig. 1 bezeichnet 10 eine Achse bzw. einen drehbaren Körper, deren Drehwinkel 9 gemessen werden soll. Auf diese Achse 10 ist ein Zahnräder 11 aufgebracht, das n Zähne besitzt. Zwei weitere Zahnräder 12 und 13, die m

und  $m + 1$  Zähne haben, sind ortsfest mit dem Zahnrad 11 gekoppelt. Die Winkel  $\psi$  und  $\theta$  dieser Zahnräder werden mit Hilfe zweier periodischer Winkelsensoren 14, 15 gemessen. Diese Messung kann berührend oder berührungslos erfolgen. Die Periodizität der Winkelsensoren soll mit  $\Omega$  bezeichnet werden. Üblicherweise wird  $\Omega = 180^\circ$  oder  $= 360^\circ$  betragen, es sind jedoch auch andere Winkelgrößen möglich.

Die Winkelsensoren sind mit einer elektronischen Auswerteschaltung 16 verbunden, in der die zur Bestimmung des Achswinkels  $\phi$  erforderlichen Berechnungen ablaufen.

Unter der Voraussetzung, daß die Winkelsensoren 14, 15 sogenannte Absolutsensoren sind, liefern sie sofort nach Einschalten der Einrichtung zur Erfassung der Winkellage der Welle 10 die beim Einschalten vorliegenden Drehwinkel  $\psi$  und  $\theta$  der Zahnräder 12 und 13. Aus diesen Winkeln kann sofort eindeutig der Winkel  $\phi$  der Welle 10 bestimmt werden, sofern die Zahl der Winkelmarken bzw. Zähne 17 des Zahnrades 11 und die Zahl der Winkelmarken bzw. Zähne 18, 19 der Zahnräder 13, 12 bekannt sind.

Je nachdem wie groß der Winkel  $\phi$ , der erfaßt werden soll, sein kann, ist die Zahl der Zähne 17, 18, 19 der einzelnen Zahnräder zu wählen. Für einen Winkelerfassungsbereich von  $\phi = 3600^\circ$  und einem Meßbereich  $\Omega$  der beiden Winkelsensoren 14, 15 von  $360^\circ$  und einer erforderlichen Genauigkeit von  $1^\circ$  muß die Zahl der Zähne des Zahnrades 11  $n = 87$  sein, die Zahl der Zähne  $m$  muß dann  $= 29$  sein. Mit solchen Zahnrädern läßt sich der Winkelbereich von  $3600^\circ$  so darstellen, daß für die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  innerhalb dieses Winkelbereiches eindeutige Zuordnungen möglich sind. Die Berechnung des Drehwinkels  $\phi$  erfolgt nach dem Einschalten der erfundungsge-mäßigen Vorrichtung nach einem Verfahren, wie es sich z. B. Fig. 3 entnehmen läßt: Es wird in der Auswerteschaltung 16 in einem ersten Schritt S1 die nächste ganze Zahl des Ausdrückes

$$k = \frac{(m + 1) \cdot \theta - m \cdot \psi}{\Omega} \quad (1)$$

berechnet, wobei die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  zuvor gemessen wurden. Als Schritt S2 wird dann der Winkel  $\phi$  berechnet, wobei gilt:

$$\phi = \frac{m \cdot \psi + (m + 1) \cdot \theta - (2m + 1) \cdot k \cdot \Omega}{2\pi} \quad (2)$$

Im Schritt S3 wird geprüft, ob der zuvor ermittelte Winkel  $\phi$  negativ ist. Ist dies der Fall, wird im Schritt S4 die volle Winkelperiode addiert, es gilt:

$$\phi' = \phi + \frac{m \cdot (m + 1)}{n} \cdot \Omega \quad (3)$$

Der so erhaltene Winkel  $\phi'$  wird dann als tatsächlicher Meßwert  $\phi_M$  übernommen. Wird im Schritt S3 dagegen erkannt, daß  $\phi$  nicht kleiner als 0 ist, wird der in Schritt S2 ermittelte Winkel als gemessener Winkel  $\phi_M$  ausgegeben.

Nach Ausgabe des Meßwertes  $\phi_M$  beginnt die nächste Winkelbestimmung aus den nächsten gemessenen Winkeln  $\theta$  und  $\psi$  im Schritt S1.

Der Meßfehler  $E$  der einzelnen Winkelsensoren 14, 15 überträgt sich nach Gleichung (2) im Verhältnis  $m/n$  auf den Fehler des Winkels  $\phi$ , so daß durch geeignete Wahl des Übertragungsverhältnisses  $m/n$  die Meßgenauigkeit eingestellt werden kann. Wird der Meßfehler der einzelnen Sensoren allerdings so groß, daß bei der Rundung nach Gleichung (1) eine falsche ganze Zahl  $k$  berechnet wird, so ändert sich der ermittelte Winkel  $\phi$  nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft um den Betrag:

$$\Delta\phi = \pm \frac{2m + 1}{2n} \cdot \Omega \quad (4)$$

Dies läßt sich dadurch abfangen, daß die Änderung des Wertes für  $k$  nach Formel (1) verfolgt wird. Beim kontinuierlichen Übergang von  $\psi$  und/oder  $\theta$  über  $\Omega$  nach 0 und umgekehrt kann der Wert von  $k$  nur ganzzahlige Änderungen von  $\pm m$  und  $\pm(m + 1)$  annehmen. Wird ein anderer Sprung registriert, ist dies ein Hinweis auf einen zu großen Meßfehler oder einen defekten Einzelsensor. Die im Verfahren nach Fig. 3 im Schritt S1 ermittelten aufeinanderfolgenden Werte für  $k$  können also miteinander verglichen werden und bei unplausiblen Änderungen kann ein Fehler erkannt werden. Eine Fehleranzeige A kann dann von der Auswerteschaltung 16 abgegeben werden.

Damit der richtige Wert für  $k$  erhalten wird, muß der Winkelfehler der Einzelsensoren 14, 15 kleiner sein als

$$\delta = \pm \frac{0,5 \cdot \Omega}{2m + 1} \quad (5)$$

5

womit sich der maximale Winkelfehler für den Winkel  $\phi$  wie folgt ergibt:

$$\delta\phi = \frac{m \cdot \Omega}{2n \cdot (2m + 1)} \quad (6)$$

15 Größere Winkelfehler der Einzelsensoren führen auf einen Sprung von  $\phi$ , der durch eine unerlaubte Änderung von  $k$  festgestellt werden kann.

Die Möglichkeit, den Drehwinkel  $\phi$  aus den beiden Winkel  $\psi$  und  $\theta$  zu berechnen, lässt sich wie folgt erklären:  
Aufgrund der Zahnezahlen gilt der Zusammenhang zwischen dem Winkel  $\phi$  und den beiden Winkeln  $\psi$  und  $\theta$

$$\psi = \frac{n}{m} \cdot \phi \bmod \Omega \quad (\text{mod} = \text{modulo}) \quad (7)$$

$$\theta = \frac{n}{m+1} \cdot \phi \bmod \Omega \quad (8)$$

Da beide Winkel sich nach dem Winkel  $\Omega$  wiederholen, muß nur der Rest bei der Division durch  $\Omega$  verwendet werden.

Die Umkehrung von (7) und (8) lautet:

$$\phi = \frac{m}{n} \cdot (\psi + i \cdot \Omega) \quad (9)$$

$$\phi = \frac{m+1}{n} \cdot (\theta + j \cdot \Omega) \quad (10)$$

50  $i$  und  $j$  sind ganze Zahlen, die zunächst unbekannt sind, da beispielsweise bei einem Winkel  $\psi$  zwischen  $0^\circ$  und  $\Omega$  nicht bekannt ist, wie oft sich  $\psi$  über  $\Omega$  gedreht hat.

Da (9) und (10) aber denselben Winkel  $\phi$  liefern müssen, gilt (9) = (10), was auf die Beziehung

$$m \cdot i - (m+1) \cdot j = \frac{(m+1) \cdot \theta - m \cdot \psi}{\Omega} \quad (11)$$

führt.

Die linke Seite von (11) ist eine ganze Zahl, daher muß auch die rechte Seite ganzzahlig sein:

$$k = \frac{(m+1) \cdot \theta - m \cdot \psi}{\Omega} \quad (12)$$

65 Da die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  fehlerbehaftet sind (prinzipieller und statistischer Meßfehler, Digitalisierung), wird (12) in der Regel nicht ganzzahlig sein. Wählt man aber die nächste ganze Zahl dieses Ausdrucks, so werden die

Fehler der Winkel sehr stark reduziert.

Die Gleichung (11) lautet dann:

$$m \cdot i - (m + 1) \cdot j = k \quad (13)$$

Dies ist eine Gleichung für zwei Unbekannte  $i$  und  $j$ , da  $i$  und  $j$  aber ganzzahlig sein müssen, hat (13) diskrete Lösungen (sog. diophantisches Problem). Die einzige Lösung, die man für die Auswertung braucht, läßt sich leicht finden:

$$i = j = -k \quad (14)$$

Mit diesen Werten läßt sich  $\phi$  als Mittelwert von (9) und (10) berechnen (dadurch werden eventuelle Meßfehler erneut verkleinert).

$$\Phi = \frac{m \cdot \psi + (m + 1) \cdot \theta - (2m + 1) \cdot k \cdot \Omega}{2\pi} \quad (15)$$

Das so berechnete  $\phi$  kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Um eine kontinuierliche Darstellung zu erhalten, muß bei negativen Werten die volle Periode des gesamten Systems addiert werden:

$$\Phi' = \Phi + \frac{m \cdot (m + 1)}{n} \cdot \Omega \quad (16)$$

In den Fig. 2a und 2b ist eine erfundungsgemäße Vorrichtung zur Messung des Winkels der Lenkachse L eines Kraftfahrzeugs dargestellt. Zu diesem Zweck wird ein möglichst berührungsloser Sensor benötigt, der maximal 4 Lenkraddrehungen bzw. Umdrehungen der Lenkachse erfassen kann.

Die Lenkachse L, deren Winkel  $\phi$  zu bestimmen ist, entspricht der in Fig. 1 mit 10 bezeichneten Welle. Für die Zahnräder sowie die eingetragenen Winkel  $\theta$  und  $\phi$  gelten die Zusammenhänge nach Fig. 1. Zusätzlich befinden sich auf den Zahnräden 18 und 19 Magnete 20 und 21, deren Magnetisierung in der Zahnradebene liegt. Mit Hilfe zweier als AMR (d. h. anisotrope magnetoresistive)-Sensoren bezeichneten Winkelsensoren 22, 23, die den Sensoren 14, 15 nach Fig. 1 entsprechen, werden die Winkel  $\psi$  und  $\phi$  gemessen. Ein Beispiel für den Zusammenbau eines Lenkwinkelsensors ist der Fig. 2b zu entnehmen. Bei diesem Beispiel liegen die drei Zahnräder 11, 12, 13 in einer Ebene. Auf den Zahnräden 12 und 13 sind die Magnete 21, 20 angeordnet, mit Hilfe dieser Magnete sowie der beiden AMR-Winkelsensoren 22, 23 können die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  absolut erfaßt werden. Die Auswertschaltung, die die Ausgangssignale der AMR-Sensoren verarbeitet, ist als Hybridschaltung 24 dargestellt. Die Bestimmung der Winkel  $\psi$  und  $\phi$  erfolgt durch Erkennen der Magnetfeldverläufe, die von den Magneten 20, 21 verursacht werden.

Anstelle von AMR-Sensoren können auch andere Winkelsensoren, beispielsweise Winkelsensoren auf Hall-Basis, optische Sensoren, induktive, kapazitive oder resistive Sensoren verwendet werden. Je nach verwendetem Sensortyp ist es erforderlich, die Zahnräder in geeigneter Weise anzupassen. Anstelle von Zahnräden können auch Codescheiben, auf denen geeignete Codesysteme aufgebracht sind, verwendet werden.

Damit die bei Lenkwinkeln erforderliche Winkelerfassung über 4 volle Umdrehungen möglich ist, kann  $n = 69$  und  $m = 23$  gewählt werden, es ergibt sich dann eine Gesamtperiode von  $1440^\circ$ , also gerade 4 Umdrehungen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung des Winkels eines drehbaren Körpers, insbesondere eines um mehr als  $360^\circ$  drehbaren Körpers, der eine Anzahl von gleichförmigen Winkelmarken bzw. Zähnen aufweist und mit wenigstens zwei weiteren drehbaren Körpern, die eine andere Anzahl von gleichförmigen Winkelmarken bzw. Zähnen aufweisen, zusammenwirkt, dadurch gekennzeichnet, daß die Winkel  $\theta$ ,  $\psi$  der beiden weiteren drehbaren Körpern ermittelt werden und die Winkellage  $\phi$  aus den Winkeln  $\theta$  und  $\psi$  ermittelt wird, unter Berücksichtigung der herrschenden geometrischen Verhältnisse.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in einem ersten Schritt die ganze Zahl  $k$  ermittelt wird, indem die Differenz zwischen der Zahl der Zähne des Zahnrades (12) multipliziert mit dem Winkel  $\theta$  und der Zahl der Zähne des Zahnrades (13) multipliziert mit dem Winkel  $\psi$  gebildet wird und diese Differenz durch den Winkel  $\Omega$  dividiert wird und in einem zweiten Schritt der zu erfassende Winkel  $\phi$  ausgehend von diesem  $k$ -Wert bestimmt wird durch Auswertung der Gleichung

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

$$\Phi = \frac{m \cdot \psi + (m+1) \cdot \theta - (2m+1) \cdot k \cdot \Omega}{2n} \quad (2)$$

5

und bei einem negativen Winkel  $\phi$  anschließend die volle Winkelperiode hinzu addiert wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Zahl  $k$  auf plausible Änderungen überwacht wird und bei unplausiblen Änderungen von  $k$  ein Fehler erkannt wird.

10 4. Vorrichtung zur Erfassung der Winkellage mittels eines Verfahrens nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die rotierenden Körper Zahnräder sind und die Zahl der Zähne des einen Zahnrades  $n$  beträgt, die des zweiten Zahnrades  $m$  und die des dritten Zahnrades  $m+1$ , wobei die Zahlen  $n$  und  $m$  unterschiedlich sind, daß die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  mittels Sensoren (14, 15) ermittelt werden und der Winkel  $\phi$  in der Auswerteschaltung (16) ermittelt wird.

15 5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Winkel  $\theta$  und  $\psi$  mit Hilfe je eines Sensors ermittelt werden, der als Absolutwertgeber arbeitet.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der zu ermittelnde Winkel der Lenkwinkel eines Kraftfahrzeuges ist und das erste Zahnrad mit der Lenkrolle in Verbindung steht und sich mit dieser dreht.

20 7. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Sensoren, die die Winkellage der zweiten und dritten Zahnräder ermitteln, AMR-Winkelsensoren sind, die mit den Zahnradern in Verbindung stehende Magnete abtasten.

25 8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung des Winkels  $\phi$  aus den Winkeln  $\psi$  und  $\theta$  mit Hilfe einer Auswerteschaltung erfolgt, die als Hybridschaltung aufgebaut ist, wobei die beiden AMR-Winkelsensoren Bestandteil dieser Hybridschaltung sind.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

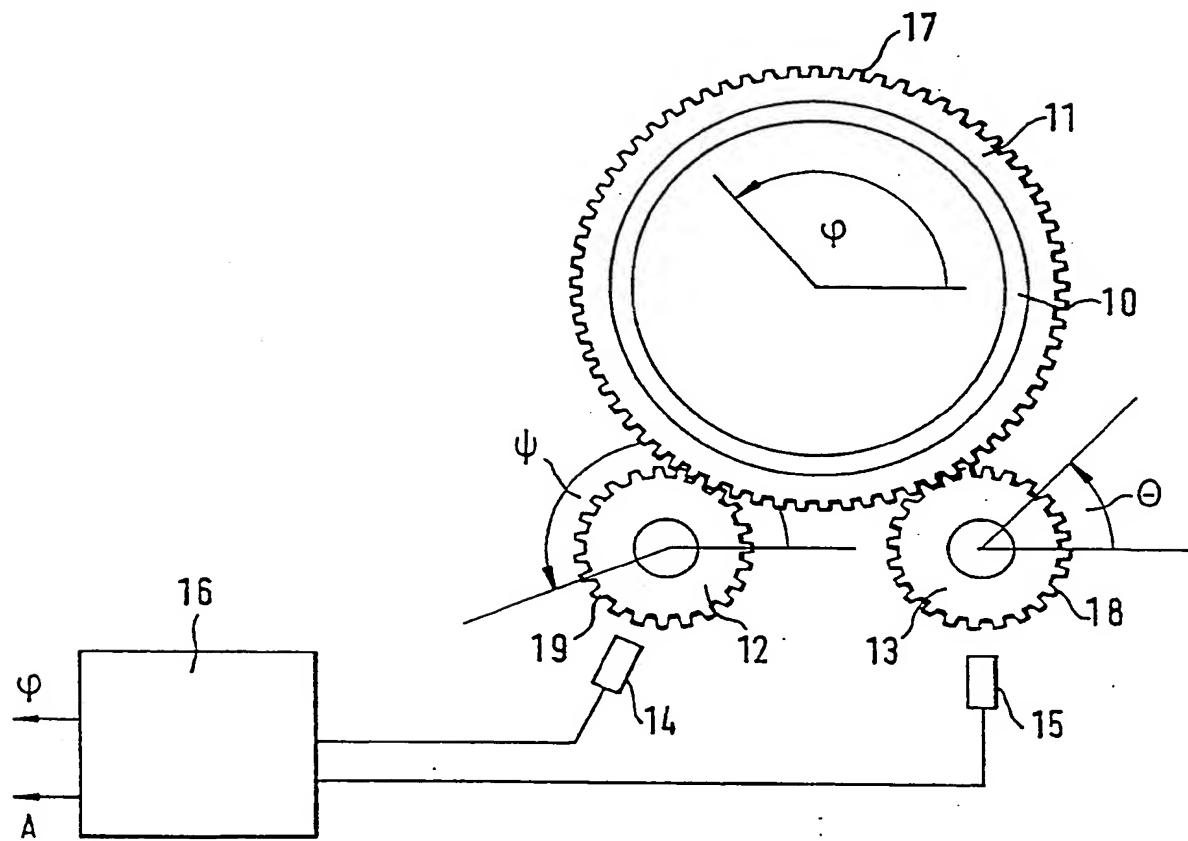


FIG. 1

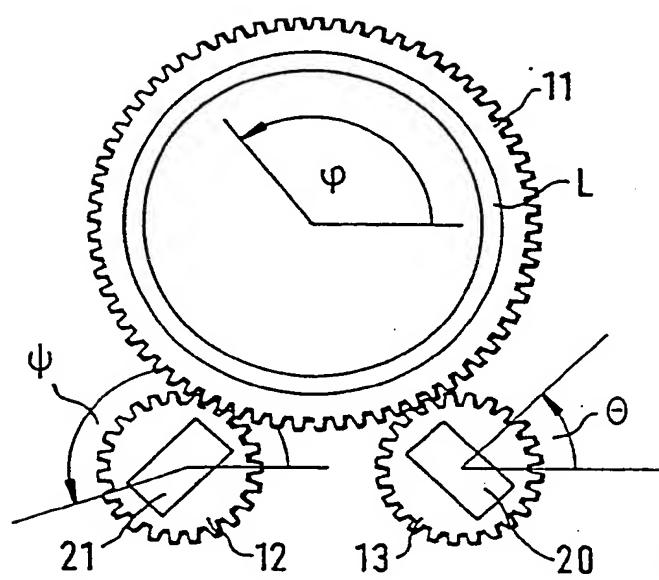


FIG. 2a

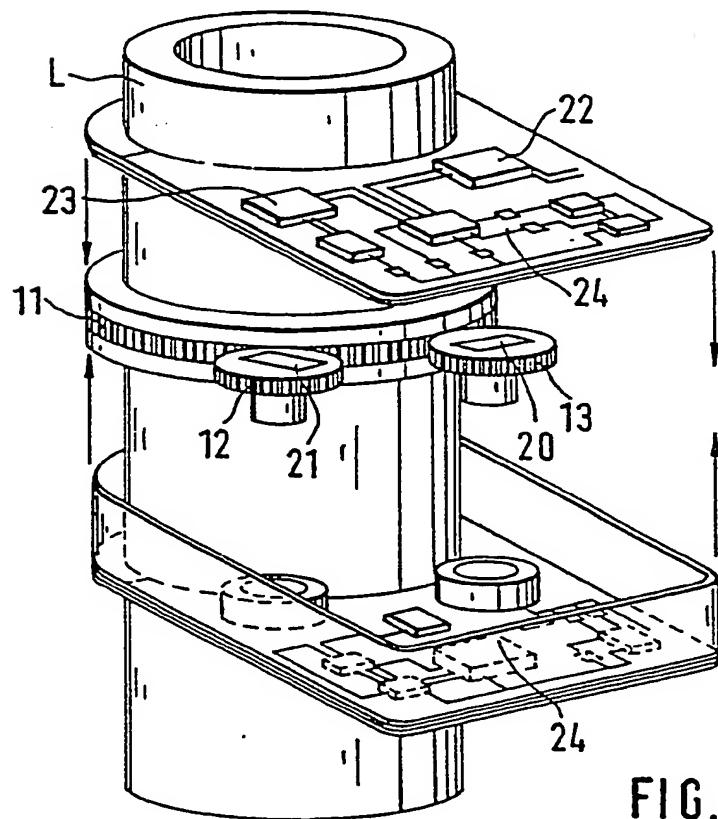


FIG. 2b

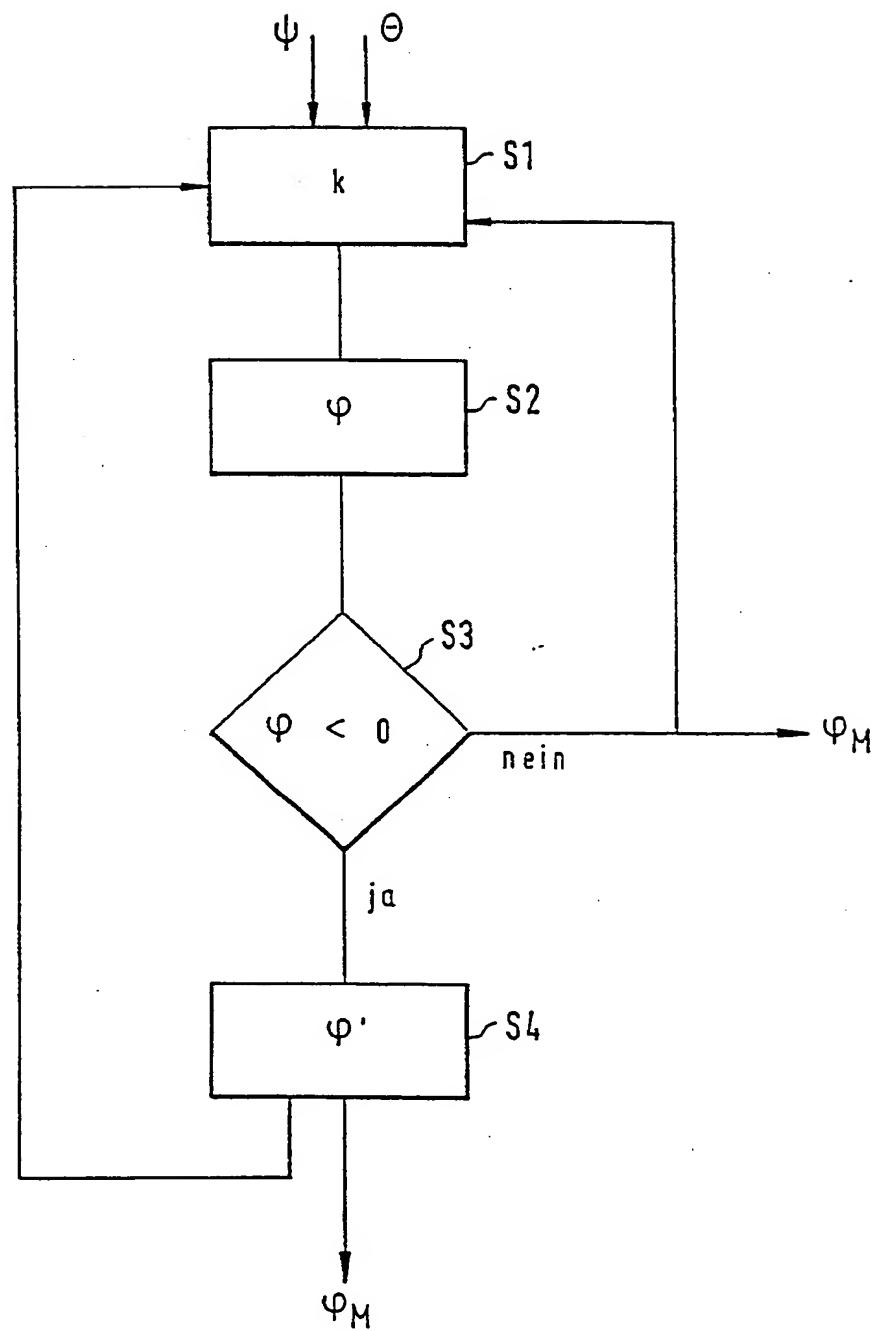


FIG. 3